

Conference Paper, Published Version

Kolarov, P.

Ankergrundfestigkeit - Versagensgründe

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102173>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Kolarov, P. (2004): Ankergrundfestigkeit - Versagensgründe. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Boden- und Sohl-Stabilität - Betrachtungen an der Schnittstelle zwischen Geotechnik und Wasserbau
Soil and Bed Stability - Interaction Effects between Geotechnics and Hydraulic Engineering. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



8 Ankergrundfestigkeit – Versagensgründe

Stability of Soil Beds concerning Anchoring – Reasons for Failure

H. Schulz

Universität der Bundeswehr, München

University of the German Federal Armed Forces (UniBwM), Munich, Germany

KURZFASSUNG: Der Beitrag beschäftigt sich mit der Stabilität von Gewässersohlen unter der Einwirkung von Wellen, das bei vor Anker liegenden Schiffen eine Rolle spielt. Es werden auf der Basis von einfachen Ansätzen, die auf Arbeiten von Köhler in der Bundesanstalt für Wasserbau zurück gehen, die Einwirkung von regelmäßigen Wellen auf die Verflüssigungen der Gewässersohle aufgezeigt. Unter den zyklische Verflüssigungen verschwindet der Widerstand des Bodens der Gewässersohle gegen den Ankerzug. Während der Zeitspanne der Verflüssigung kann daher ein Anker in dem verflüssigten Boden ohne nennenswerten Widerstand dem Ankerzug nachgeben. Damit treibt das vor Anker liegende Schiff in der Windrichtung ab, was bei auflandigem Wind zur Strandung führen kann. Eine solche Strandung unter Anker wird am Beispiel des brennenden Holzfrachters Pallas, der im Jahre 1998 vor der Schleswig-Holsteinischen Küste strandete, betrachtet.

ABSTRACT: The paper describes a phenomenon of bed stability where effects of wave loading play a special role for the safety of anchoring vessels. Using a simplified approach, which is based on the work carried out by Köhler at the Federal Waterways Engineering and Research Institute, it is shown what effects steady waves have on causing fluidisation of sea and river beds. During cyclic fluidisation phases the resistance of the sea bed diminishes against the anchoring strain and therefore the anchorage may fail to fulfill the shear resistance requirements. In such a case the vessel would drift in the wind direction. By prevailing onshore winds a vessel is in danger of being driven ashore. Using the case study of the burning wood-laden freighter “Pallas”, which was ship wrecked in 1998 on the coast line of Schleswig-Holstein, comparative investigations have been viewed and examined.

8.1 Einleitung

Auf Schiffen, die vor Anker liegen, muss eine Ankerwache an Bord sein, deren Aufgabe es ist, die Ankerposition des Schiffes zu überwachen. Im GPS - Zeitalter übernimmt diese Aufgabe ein Computer, der ein Warnsignal ertönen lässt, wenn das Schiff einen zuvor definierten Bereich um seine Ankerposition verlässt, wenn es also zu driftet beginnt. Offensichtlich kann man nicht davon ausgehen, dass sich die Position vor Anker liegender Schiffe nicht verändert. Was sind die Gründe für das Verdriften, unter welchen Bedingungen geschieht das? Wie kann die Ankergrundfestigkeit abgeschätzt werden.

Die nachfolgenden Betrachtungen zur Ankergrundfestigkeit können nicht den Anspruch wissenschaftlicher Durchdringung des Themas für sich in Anspruch nehmen und sollen das auch nicht. Sie sind eher als eine Studie des Problems zu betrachten und sollen zeigen, wo überall die beharrliche Arbeit des heute zu Ehrenden Früchte der vertieften Erkenntnis trägt. Sie sollen auf eine Problematik hinweisen, die für Bauingenieure allenfalls im Offshore-Bereich relevant wird, dagegen Nautiker häufig vor schwierige Fragen stellt. Neben der Erscheinung des Driftens vor Anker liegender Schiffe können auch Seezeichen erheblich verdriften, was ernsthafte Konsequenzen für die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs haben kann.

8.2 Grundlagen

Die Anfänge der Betrachtung des Ankerwiderstandes der Gewässersohle können letztlich auf Untersuchungen zurück geführt werden, bei denen der Einfluss variierender Wasserdrücke auf den Spannungszustand unter der Gewässersohle behandelt wurde. Die Grundlage aller Untersuchungen stellt die Konsolidationsgleichung von Biot, 1941, dar, mit der das Konsolidationsverhalten des Dreiphasenstoffes beschrieben wird. Zahlreiche Publikationen beschäftigen sich seither mit diesem Thema, wobei in den 70-er Jahren elastisches Verhalten des Bodens unter der Gewässersohle im Vordergrund stand, während in den letzten Jahren mit Koenders, Köhler und Schwab Ansätze verfolgt worden sind, bei denen die Fluidisierung nichtbindiger Gewässersohlen mit einem visko-plastische FE-Modell in den Focus gerückt sind (Schwab, R. und Köhler, H.-J., 2002, Koenders, M. A., 2002).

Die folgenden Betrachtung zur Ankergrundfestigkeit sollen, dem Rahmen des heutigen Tages entsprechend, auf die Ansätze von Köhler aufgebaut werden, die von ihm im Zusammenhang mit der Stand-sicherheit von Deckwerken entwickelt und erstmals 1986 einem größeren Publikum vorgestellt worden sind (Schulz, H.; Köhler, H.-J., 1986). Kernpunkt der Betrachtung ist die Annahme eines Dreiphasensystems aus Feststoff, flüssiger und gasförmiger Pha-

se auch im als gesättigt angesehenen Boden unter der Gewässersohle. Die Anwesenheit der gasförmigen Phase bedingt bei Druckänderungen in der flüssigen Phase Volumenänderungen, die in Abhängigkeit von den Entwässerungsbedingungen und der Kompressibilität des Korngerüstes zeitverzögert eintreten und daher den Druckausgleich auch zeitverzögert eintreten lassen. Dies führt bei Abnahme des Drucks an der Gewässersohle zu Porenwasserüberdrücken im Boden unter der Gewässersohle und umgekehrt, zu Porenwasserunterdrücken und damit Zunahme der effektivem Spannungen des Bodens bei Zunahme des Drucks an der Gewässersohle.

Für Stabilitätsfragen des Bodens unter der Gewässersohle stellen Porenwasserüberdrücke eine Herausforderung für den Ingenieur dar. Ihre Quantifizierung ist erforderlich, um standsichere Bauwerke zu errichten. In besonderem Maße war für die WSV diese Frage bei Deckwerken an Wasserstraßen relevant, bei denen der mit einem vorbeifahrenden Schiff auftretende Wasserspiegelabsenk die Druckänderung bewirkte, die im Untergrund zu Porenwasserüberdrücken führte und die Deckwerke destabilisierte.

Allgemeine Grundgleichung:

$$\text{Dgl.:} \quad \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{c_v} \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$$

Eindim. Lösung der Dgl. für regelmäßige Wellen:

$$p = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{T \cdot c_v}} \cdot z\right) \cdot \sin\left(-2 \cdot \pi \cdot \frac{t}{T} + 2 \cdot \pi \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{T \cdot c_v}} \cdot z\right)$$

mit: p_0 Druckamplitude der Wellen = $h \cdot \rho_w \cdot g$
 h Wellenamplitude
 ρ_w Dichte des Wassers
 g Erdbeschleunigung
 z Tiefe unter der Gewässersohle
 T Wellenperiode
 t Zeit
 c_v Konsolidierbeiwert

Die Stoffeigenschaften:

Der Konsolidierbeiwert im ungesättigten Porenmedium:

$$c_v = \frac{k}{\gamma_w \cdot (\alpha + n \cdot \beta)}$$

mit: k Durchlässigkeitsbeiwert
 $\alpha = \frac{1}{E_s}$ E_s Steifemodul für einaxiale Kompression
 $\beta = \beta_0 + \frac{1-S}{p_a + p}$ Kompressionsbeiwert des gashalt. Porenmediums
 S Sättigungsgrad
 β_0 Kompressionsbeiwert des gasfreien Porenmediums
 p_a, p Atmosphärendruck, hydrostatischer Druck
 n Porenanteil
 γ_w Wichte der Porenflüssigkeit

Bild 1 – Berechnungsmöglichkeiten des Porenwasserüberdrucks

Die Quantifizierung der Porenwasserüberdrücke war daher ein vordringliches Problem, das von Köhler vornehmlich durch Naturmessungen an Wasserstra-

ßen, aber auch durch großmaßstäbliche Laborversuche [Köhler, 1989], angegangen worden ist. Daraus konnte ein pragmatischer Ansatz zur Lösung der Differentialgleichung (Bild 1) gewonnen werden, der in einem Zahlenwert, dem sog. Porenwasserdruckparameter b , fast alle die, die Porendruckentwicklung beschreibenden Einflüsse vereinigte (Bild 2), die zur Lösung der Differentialgleichung des eindimensionalen Problems¹ benötigt werden.

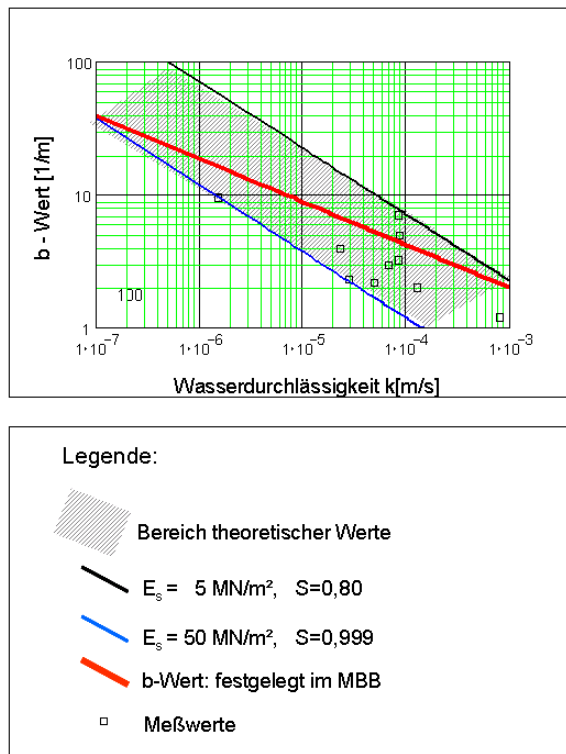


Bild 2 – Der b-Wert als Funktion der Durchlässigkeit
(Theoretische Werte, Messwerte und Rechenwerte nach
MBB für eine Absinkdauer von $T_a=5s$)

In Bild 2 sind allerdings nur die Werte von b enthalten, die bei Absunkereignissen an Wasserstraßen auftreten. Für Absunkereignisse mit Absunkzeiten, die über die an Wasserstraßen auftretenden hinausgehen, muss auf theoretische Zusammenhänge zurück gegriffen werden, die in Bild 3 wieder gegeben sind.

Zum leichteren Verständnis weiterer Bilder sei auf folgende Zusammenhänge hingewiesen:

Speicherlänge L_{ES} : $L_{ES} = \sqrt{T \cdot c_v}$
mit: T: Wellenperiode

1 Auf die Wiedergabe der theoretischen Grundlagen der Berechnung der instationären Porendrücke von Drei-Phasensystemen soll hier nicht eingegangen werden. Dazu wird auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen.

c_v : Konsolidierungsbeiwert

Porenwasserdruckparameter $b: b = \sqrt{\pi/L_{Es}}$

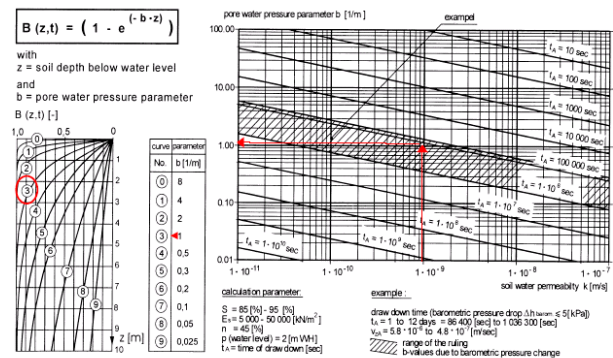


Bild 3 – Einfluss von Absinkdauer und Durchlässigkeit auf den Betrag des b-Wertes [Köhler, H.-J., 2003, Fragestellungen aus der Wasser-Boden-Wechselwirkung im ungesättigten Boden unter Wasser, BAW-Kolloquium 23. Okt. 2002]

8.3 Porenwasserdrücke unter der Gewässersohle

Mit dem in Bild 1 dargestellten Lösungsansatz ist die in Bild 4 dargestellte Porenwasserdruckverteilung infolge regelmäßiger sinusförmiger Wellen berechnet worden. Die Annahme regelmäßiger sinusförmiger Wellen liegt relativ weit neben der Realität, doch um das Prinzip aufzuzeigen, soll dieser Ansatz ausreichen. Entsprechend stellt der Ansatz des eindimensionalen Porendruckausgleichs eine im vorliegenden Rahmen hinnehmbare Vereinfachung dar, da die im behandelten Beispiel auftretenden Wellenlängen L wesentlich größer sind als die Einwirkungstiefe der Druckdissipation, die Speicherlänge L_{Es} ($L_{Es} \ll L/4$).

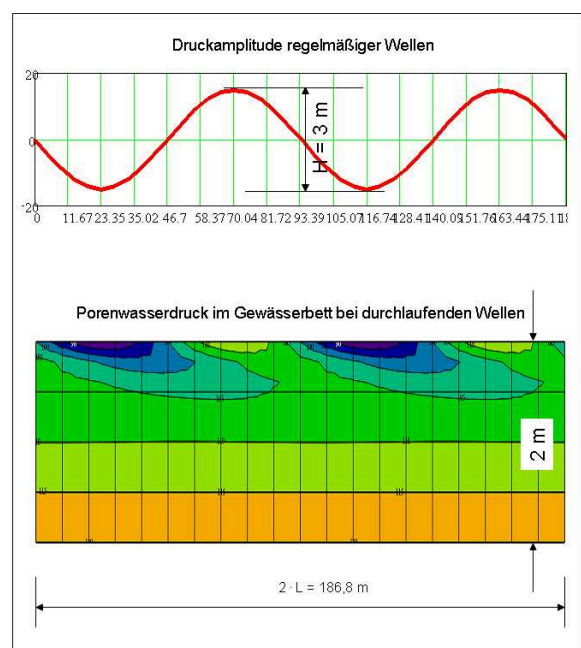


Bild 4 - Druckamplitude und Porenwasserdruck

Für die Eigenschaften der Gewässersohle wurden folgende Werte angenommen:

Steifemodul E_s :	25 MN/m ²
Porenanteil n :	0,35
Durchlässigkeitsbeiwert k :	$5 \cdot 10^{-5}$ m/s
Sättigungsgrad S :	0,9

Der Durchlässigkeitsbeiwert k der Gewässersohle repräsentiert einen gleichkörnigen Fein- bis Mittelsand, der aufgrund des Steifemoduls im ungestörten Zustand etwa mitteldicht gelagert ist. Aus diesen Daten ergibt sich eine Speicherlänge $L_{Es} = 0,67$ m bzw. ein b -Wert von $b = 2,66$. Dieser b -Wert liegt im unteren, für steife und feste Böden geltenden Bereich des Bildes 2. Der für die Bemessung von Deckwerken aufgrund von Versuchen anzusetzende b -Wert ist beim gleichen Durchlässigkeitsbeiwert größer und repräsentiert Böden mit geringerer Steifigkeit.

Die Daten der Wellen sind:

Wassertiefe d :	10 m
Wellenhöhe H :	3 m
Wellenlänge L :	93,4 m
Wellenperiode T :	10 s

Bild 4 zeigt die hydrostatischen Drücke infolge einer durchlaufenden Welle in einem ebenen, lotrechten Schnitt der Gewässersohle von etwa 187 m Länge und 2 m Höhe. Dunkle blau Farben stellen niedrige Drücke dar. Man erkennt deutlich den Einfluss der Wellen und die Periodizität des Auftretens niedriger und höherer Porendrücke in der Gewässersohle.

Aus den Porendrücken lassen sich die Porenwasserüber- und Unterdrücke gegenüber dem Ruhewasserspiegel ermitteln (Bild 5). Die Bereiche warmer Farben stellen Bereiche mit Porenwasserüberdrücken, bläuliche Farben solche mit Porenwasserunterdrücken gegenüber dem mittleren Wasserspiegel dar. Die Porenwasserüberdrücke dränieren nach der Gewässersohle, da der Dränageweg dorthin wesentlich kürzer ist als zu den Bereichen von Porenwasserunterdrücken in Richtung der Gewässersohle. Dadurch entstehen zur Gewässersohle gerichtete instationäre Gradienten, die die Eigengewichtsspannungen des Bodens reduzieren bzw. aufheben. Bild 6 zeigt die rechnerische Verteilung der effektiven Vertikalspannungen σ_v' infolge der Einwirkung durchlaufender Wellen unter eindimensionaler Dränage. Man erkennt, dass rechnerisch Bereiche mit negativen effektiven Vertikalspannungen σ_v' auftreten. Tatsächlich fluidisiert der Boden in diesen Bereichen und verliert seine Reibungsfestigkeit, da keine Kornkontakte mehr bestehen. Die Ausdehnung der fluidisierten Bereiche wird aber durch die instationäre Veränderung der maßgebenden Parameter während des Durchlaufens der Wellen beeinflusst, sodass die erhaltenen Ergebnisse

nur Näherungscharakter haben. Zutreffendere Ergebnisse erhält man beispielsweise mit dem Ansatz von Köhler und Koenders, 2001, bei dem nichtlineare Zustandsänderungen des Bodens der Gewässersohle berücksichtigt werden.

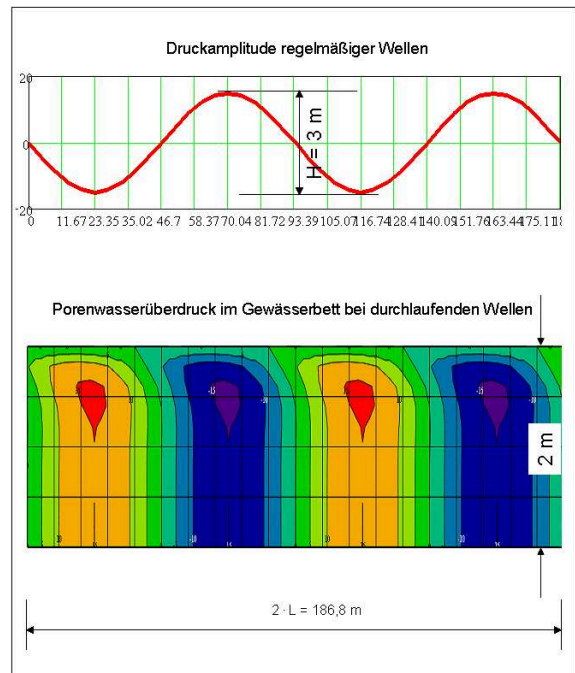


Bild 5 – Druckamplitude und Porenwasserüberdruck

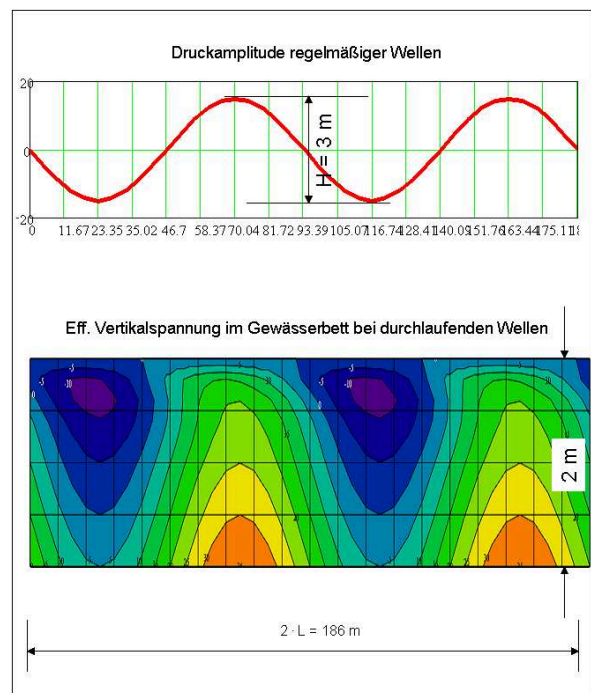


Bild 6 - Druckamplitude und eff. Vertikalspannung

Als wesentlicher bodenmechanischer Effekt muss die Tatsache festgehalten werden, dass ein betrachteter Ort an der Gewässersohle beim Durchlaufen von Wellen zyklische Entfestigungen erfahren kann, wenn die Wellen ausreichend hoch sind. Vergleichsberechnungen haben gezeigt, dass dies bei

den angesetzten Daten für den Boden, die Wassertiefe, Wellenlänge und Wellenperiode bereits bei Wellenhöhen von 70 cm beginnt.

8.4 Wirkungsweise von Ankern unter dem Einfluss von Wellen

Die Vorstellung über die Wirkung von Ankern ist in Bild 7 wieder gegeben. Danach geht man davon aus, dass, je nach Ankerart, eine oder mehrere sog. Flunken des Ankers sich unter der Wirkung der Ankerzugkraft in die Gewässersohle eingraben und dort über die Mobilisierung von räumlichem Erdwiderstand die Haltekraft bewirken, die ein Verdriften eines Schiffes auch bei starkem Wind oder Sturm bzw. Strömung verhindert. Bild 8 zeigt einige Ankertypen. Allen ist gemeinsam, dass die Einwirkung der Zugkraft zusammen mit dem Bewegungsablauf des Ankers zum Eingraben in die Gewässersohle führt, wie dies Bild 7 zeigt.



Bild 7 – Wirkungsweise eines Ankers

Um die Haltekraft zu entwickeln, ist also Erdwiderstand von Nöten, der nur mobilisiert werden kann, wenn der Boden der Gewässersohle ausreichende Reibungskraft aufbringt. Dazu wiederum ist Voraussetzung, dass der Boden möglichst hohe effektive vertikale Spannungen aufweist. Diese sind unter Wasser zwar durch den Auftrieb reduziert, sie reichen aber im Allgemeinen aus, die erforderliche Haltekraft aufzubringen, um ein Verdriften bei Wind und Strömung zu verhindern.



Stockanker



Klippanker



Vierflunkenanker

Bild 8 – Beispiele von Ankern

Dies wird z.B. vom Germanischen Lloyd dadurch sicher gestellt, dass Anforderungen an Ankergewichte in Abhängigkeit von der Schiffsgröße zu beachten sind. Diese beruhen letztlich auf Jahrhunderten nautischer Erfahrungen, aber nicht auf Theorien zur Ankerbemessung. Daher ist ein Verlust der Haltekraft nicht auszuschließen, wenn besonders ungünstige Bedingungen auftreten, da die zugrunde gelegten Erfahrungen zweifellos einen Kompromiss aus Sicherheit, Handhabung und Kosten darstellen.

Betrachtet man allerdings die Ankersituation unter der Einwirkung von Wellen und den damit verbundenen Fluidisierungsphasen, dann zeigt sich, dass bei Bedingungen, wie sie Bild 6 zugrunde liegen, keine kontinuierliche Haltekraft entstehen kann. Zwar wird der Anker infolge seines Gewichtes tiefer in die fluidisierte Gewässersohle eindringen bzw. regelrecht darin versinken, als das ohne Fluidisierung der Fall wäre, aber während des Durchgangs des Wellentals über dem Anker geht die Haltekraft zurück oder gar ganz verloren. Das hängt davon ab, ob der Anker mit seinen Flunken so tief in die Gewässersohle eindringen kann, dass Widerstand unterhalb der fluidisierten Tiefe mobilisiert wird. Gelingt dies nicht, wird der Anker in der Fluidisierungsphase durch den Boden wie durch eine zähe Flüssigkeit in der Richtung des Ankerzuges gezogen.

Da man davon ausgehen kann, dass der Anker, wenn er keinen Halt findet, sich langsamer bewegt als die Wellen, wird beim Durchgang des nächsten Wellenberges unter den wieder ansteigenden effektiven Vertikalspannungen in der Gewässersohle auch die Haltekraft des Ankers wieder ansteigen und damit wird die Drifttendenz des Schiffes solange gestoppt, bis das nächste Wellental wieder zu einer Fluidisierung führt.

Diese Situation ist bei Nautikern sehr gefürchtet, zumal wenn das Schiff auf „Lagerwall“ liegt, d.h. vor einer Küste bei auf die Küste gerichtetem Wind. Eine Strandung wäre dann nicht auszuschließen und ein Blick in die Seekarten der deutschen und niederländischen Küstengewässer zeigt, dass diese Situation dort häufig gegeben war und noch gegeben ist. Erst vor wenigen Jahren trug sich vor der Küste Schleswig-Holsteins ein Strandungsereignis zu, das nachfolgend etwas detaillierter betrachtet werden soll, um die zuvor erläuterten Mechanismen der oszillierenden Haltekraft von Ankern bei starkem Seegang zu illustrieren.

8.4 Der Fall Pallas

Die Pallas ist ein Frachtschiff von ca. 120 m Länge, ca. 15 m Breite und ca. 7 m Tiefgang. Ihre BRZ (Bruttoreaumzahl) beträgt ca. 4000. Sie war mit einer Ladung Paketholz in der Nordsee unterwegs und geriet am 26.10.1998 nördlich von Sylt in dänischen Gewässern in Brand.

Fahrt der „Pallas“

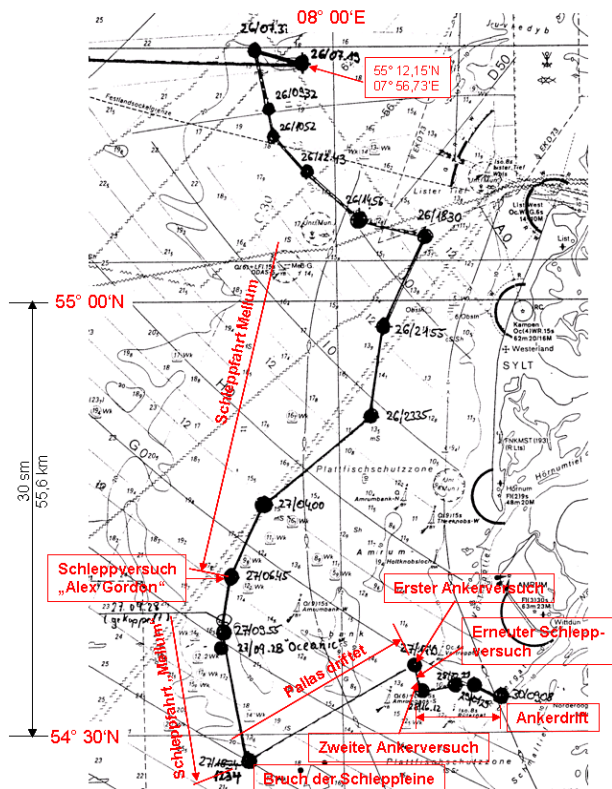


Bild 9 – Fahrt der Pallas

Gleichzeitig war ein anderes in der Nordsee in See- not geratenes Schiff in Sicherheit zu bringen. Die Bemühungen um die Pallas sind in der Anlage aus der seeamtlichen Chronologie der Ereignisse in verkürzter Form wieder gegeben. Bild 9 enthält den Weg, den das brennende Schiff während der dramatischen Tage zwischen dem 26. und dem 29. Oktober 1998 teils im Schlepp, teils driftend zurück gelegt hat. Die markanten Ereignisse sind in diesem Bild vermerkt. Die Bilder 10 bis 12 vermitteln einen Eindruck von dem brennenden und dem gestrandeten Schiff.



Bild 10 – Pallas brennend



Bild 11 – Pallas brennend



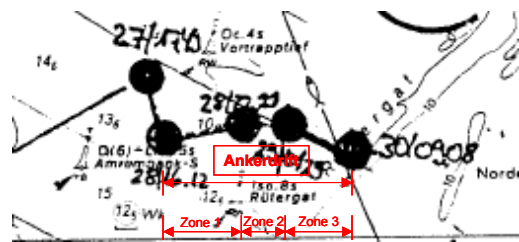
Bild 12 – Pallas gestrandet

Interessant im Zusammenhang mit der Frage nach der Ankergrundfestigkeit ist die Zeit vom 28.10. etwa 16.00 Uhr bis 29.10. etwa 05.30 Uhr. In dieser Zeit driftete die Pallas vor Anker, bis sie nach 05.15 Uhr strandete. Dazu ist in Bild 13 der Ankerdrift-bereich vergrößert dargestellt und in drei Zonen unterteilt. Für diese Zonen wurden in der darunter angeordneten Tabelle die Wetterbedingungen angegeben, wie sie nach dem amtlichen Gutachten des deutschen Wetterdienstes, auszugsweise in Anlage 2 wiedergegeben, im Seegebiet um die Pallas geherrscht haben. Zudem sind in der Tabelle die Längen der markierten Zonen angegeben, sodass sich aus den ebenfalls in Bild 13 angegebenen Zeiten die Driftgeschwindigkeiten berechnen lassen. Diese lagen zwischen 0,4 und 0,5 kn. Umgerechnet sind das rund 0,9 km/h oder ungefähr 0,25 m/s.

Um eine Vorstellung über die Verhältnisse an der Gewässersohle zu vermitteln, sollen nachfolgend einige Detailbetrachtungen angestellt werden. Während einer Wellenperiode von 10 Sekunden ist der Driftweg 2,5 m. Geht man von der Hypothese dieses Beitrages aus, dass der Driftweg in der Zeit der Fluidisierung der Gewässersohle während des Durchgangs des Wellentals stattfindet, dann steht dafür etwas weniger Zeit zur Verfügung als das Wellental braucht, um über den Anker hinweg zu laufen. Bei einer Periode von 10 Sekunden kann die Zeitdauer, in der der Anker weitgehend vollständig im verflüssigten Boden liegt, mit etwa 3 bis 4 Sekunden abgeschätzt werden. In dieser Zeit bewegt er sich 2,5 m, d.h. seine Geschwindigkeit durch den Ankergrund kann in dieser Zeit zwischen 0,6 m/s und 0,8 m/s liegen. Mit dem Durchgang des folgenden Wellenberges nehmen die Reibungskräfte des Ankergrundes wieder zu und der Anker stabilisiert sich, bis das Durchpflügen wieder aufs Neue beginnt.

Neben dem Anker selbst spielt auch die Länge der Kette bei der Mobilisierung der Haltekraft mit. Je länger die Kette ausgesteckt wird, desto besser hält der Anker. Dies ist leicht vorstellbar. Bei einer Gesamtlänge von 8 bis 9 Kettenlängen (eine Kettenlänge sind 27,5 m), d. h. von 220 m bis 258 m, liegen mindestens zwei Abschnitte der Kette immer unter einem Wellenberg, zwei Abschnitte dagegen unter einem Wellental. Im Bereich eines Wellentales wird die Kette auf Grund ihres Gewichtes um ein bestimmtes Maß in die Gewässersohle einsinken, aber keine Haltekkräfte entwickeln, unter dem Wellenberg wird sie dann durch die Zunahme der effektiven Spannungen Reibungskräfte mobilisieren, wenn der Kettenzug entsteht und sie wird wie ein Erdanker wirken. Bei genügend langer Kette werden immer mehrere Wellenberge über der Kette sein, sodass die Haltekraft des gesamten Ankergeschirrs dazu beiträgt, das Schiff langsamer abtreiben zu lassen, als es durch Strömung und Wind sonst der Fall wäre.

Auszug aus dem Weg der „Pallas“:
Phase der Ankerdrift und der Strandung



Zone	1	2	3
Windrichtung	280°	290°	280/290°
Windstärke in kn	22 kn	20 kn	30 kn
Windstärke in Bft.	6	6	7
Wellenhöhe	4 m	3,5 m	4 m
Wellenperiode T	10 s	10 s	12 s
Wellenlänge L (berechnet)	93,4 m	93,4 m	114,5 m
Länge der Zone	2,3 sm	1,2 sm	2,0 sm
Driftzeit	4h 09'	3h 08'	4h ¹⁾
Driftgeschwindigkeit	≈ 0,5 kn	≈ 0,4 kn	≈ 0,5 kn

¹⁾ Die Driftzeit wurde aus der Chronologie der Ereignisse mit der Strandung um etwa 05.30 Uhr als beendet angesehen.

Bild 13 – Weg der Pallas während der Ankerphase
und Daten zu wetter- und Windverhältnissen

Die Driftgeschwindigkeit ohne Ankergeschirr kann aus Bild 8 ermittelt werden. Dort ist die Strecke markiert, die die Pallas bei dem Versuch am 27.10.98, die Schleppverbindung erneut herzustellen, in rund 5 Stunden verdriftete. Man entnimmt dem Bild eine Driftstrecke von 12,6 sm. Damit beträgt die Driftgeschwindigkeit ohne Ankergeschirr rund 2,5 kn, rund das 5-fache der Driftgeschwindigkeit mit Ankergeschirr.

Bei diesen Betrachtungen ist noch zu berücksichtigen, dass im Seegebiet um die havarierte Pallas noch Strömungen vorhanden sind, die die Driftgeschwindigkeit erhöhen oder verlangsamen. Während der Zeitspanne der Ankerdrift vom 28.10., etwa 16.30 Uhr bis 29.10., etwa 05.30 Uhr, also während 11 Stunden, musste eine Stromkenterung auftreten. Diese hat sich aber nicht merklich auf die, zugegebenermaßen relativ groben Betrachtungen zum Driften, ausgewirkt. Da keine Informationen über die Gezeiteneinflüsse zur Verfügung stehen und auch in allen verfügbaren Unterlagen keine Erwähnung fanden, darf davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der Tidenströmung in diesem Gebiet gering im Vergleich zur Windeinwirkung gewesen sein muss.

8.5 Folgerungen

Aus den angestellten Betrachtungen ergeben sich keine grundsätzlich neuen Konsequenzen für die Schifffahrt: die Ankersicherheit wird verbessert, wenn ein zweiter Anker ausgebracht wird und wenn mehr Kette gesteckt wird. Ob auf der Pallas noch ein zweiter Anker vorhanden war, muss nach der Chronologie der Ereignisse in Frage gestellt werden, denn ein Anker wurde beim Wiederaufnehmen der Schleppverbindung am Nachmittag des 27.10. gekappt. Aber dieses wäre eine Konsequenz aus den vorliegenden Betrachtungen: selbst wenn ein zweiter Anker ausgebracht worden wäre, wäre es wichtig gewesen, ihn so auszubringen, dass er nicht gleichzeitig mit dem ersten Anker in einem Wellental liegt, sondern nach Möglichkeit unter einem Wellenberg. Ob sich eine solche Schlussfolgerung in der Praxis realisieren lässt, muss von nautischer Seite geklärt werden. Allerdings ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein zweiter Anker auch immer in einem Wellental liegt, höchstens 50%. Das Ausbringen von mehr Kette ist dagegen immer nützlich, da dann ein größerer Teil der Ankerkette unter Wellenbergen liegt und die Kette damit mehr Ankerzug aufnehmen kann.

Die Form der Wellen in der Natur weicht von der angenommenen sinusförmigen Welle erheblich ab, wenn sie in flaches, als Ankergrund in Frage kommendes Wasser, laufen. Dadurch werden die bodenmechanischen Vorgänge selbst nicht grundsätzlich verändert, jedoch werden sie komplizierter. Außerdem ist aufgrund der Orbitalbewegungen mit Materialtransporten an der Gewässersohle zu rechnen und es können Kolke um den Anker entstehen. Es ist anzunehmen, dass dies bei der Pallas auch der Fall war.

8.6 Danksagung

Herr Hinz von der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord in Kiel hat die Unterlagen und Bilder zum Seeunfall der PALLAS zur Verfügung gestellt. Dafür sei ihm herzlich gedankt.

8.7 Literatur

Biot M. E., 1941

General Theory of Three-Dimensional Consolidation. Journal of Applied Physics, Vol. 12, February 1941, New York

Deutscher Wetterdienst, Geschäftsfeld Seeschifffahrt, 1999

Amtliches Gutachten über die Wetter- und See- gangsbedingungen vom 25.10-07.11.98 in Bezug auf

die Havarie des MS 'PALLAS' in der Deutschen Bucht vom 22.01.1999

Köhler, H.-J., 1989

Messung von Porenwasserüberdrücken im Untergrund, Mitt.-Blatt BAW, , Nr. 66

Köhler, H.-J., Koenders, M.A., 2001

Direct visualisation of underwater phenomena in soil-fluid interaction and analysis of the effects of an ambient pressure drop on unsaturated media, Journal of Hydraulic Research, International Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR), Delft, The Netherlands

Koenders, M. A., 2002

Erosion and Gas Content in Subsoil, BAW-Kolloquium: Der Einfluss von Lufteinschlüssen auf die Strömungs- und Druckdynamik in Erdbauwerken, BAW Karlsruhe, 23. Oktober 2002

Oltmann, P., Heinke, C., 1996

Schleppkapazität – Technische Anforderungen an Notschlepper in der Deutschen Bucht, Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt

Schulz, H.; Köhler, H.-J., 1986

Bemessung von Deckwerken unter Berücksichtigung von Geotextilien, Proc. of the 3rd Int. Conf. on Geotextiles, Wien, 1986, Balkema-Verlag Rotterdam

Schwab, R., Köhler, H.-J., 2002

Verhalten von teilgesättigten Böden unter Wasser, BAW-Kolloquium „Der Einfluss von Lufteinschlüssen auf die Strömungs- und Druckdynamik in Erdbauwerken, 23.10.2002

Zacher

Chronologie der Ereignisse beim Seeunfall der „PALLAS“, zur Verfügung gestellt von der WSD-Nord

Anlage 1: Chronologie der Ereignisse beim Seeunfall der „Pallas“

25. Oktober 1998

- 15.40 Uhr: Dänisches Seenotrettungszentrum (MRCC Denmark) erhält Nachricht über Funk, daß MS „Pallas“ (Flagge Bahamas) durch Ladungsbrand (Holzladung) in Seenot geraten ist.
- 17.31 Uhr: Deutsches Seenotrettungszentrum (MRCC Bremen) schickt Rettungskreuzer „Minden“ von Sylt zur Unglücksstelle und informiert den Zentralen Meldekopf Cuxhaven (ZMK).
Position: 55° 13,7' N, 06° 25,9' E.
- 17.36 Uhr: MRCC Bremen meldet dem ZMK: Feuer unter Kontrolle, Unterstützung durch KüWaZ nicht mehr erforderlich.

26. Oktober 1998 (starker Wind aus westlicher Richtung, 6 Bft., Wellenhöhe 3 - 4 m)

- 04.00 Uhr: Bergung der Besatzung des brennenden Havaristen durch dänischen und deutschen Rettungsdienst (Hubschrauber) abgeschlossen; 16 Seeleute gerettet, davon einer schwer verletzt, ein Todesopfer.
Schiff treibt brennend mit noch laufender Maschine (jedoch Propeller-schub Null) in Richtung Westküste Schleswig-Holstein, 20° Ruderlage.
- 07.19 Uhr: MRCC Bremen meldet: Fahrzeug auf 55° 12,15' N, 07° 56,73' E, dänisches Rettungsboot abgezogen (Seenotfall im DK-Gebiet),
Driftrichtung: Sylt.
- 09.36 Uhr: BGS-Hubschrauber gibt aktuelle Position an: 55° 09' N, 07° 53' E, keine Fahrzeuge in der Nähe, Schiff brennt lichterloh.
- 11.40 Uhr: Anfrage an SOK/DK bezüglich Ladung der „Pallas“. Antwort: Ladung besteht ausschließlich aus Paketholz.
- 14.56 Uhr: „Neuwerk“ und „Mellum“ haben Brandbekämpfung aufgenommen.
- 16.35 Uhr: Sechs Feuerwehrleute aus Cuxhaven mit Heli auf „Neuwerk“ abgesetzt.
- 18.30 Uhr: Vier Mann von „Meerkatze“ auf „Pallas“ abgesetzt. „Neuwerk“ versucht Schleppverbindung zum Havaristen mit Hilfe der 4 Leute der „Meerkatze“ her zustellen. In Cuxhaven wird Notliegeplatz für Havaristen vorbereitet.
- 19.35 Uhr: Schleppverbindung nicht gelungen. Schlepptrossen aus Polyprop in Schraube der „Neuwerk“ geraten, „Neuwerk“ nur noch eingeschränkt einsatzbereit.
- 19.57 Uhr: „Mellum“ hat Schleppverbindung mit 2 Polypropylen-Trossen hergestellt. Schleppverband „Mellum“/„Pallas“ nimmt Kurs auf Helgoland, um Landschutz zu suchen. Abstand zur Küste 6 sm.
- 21.55 Uhr: Alle Luken stehen in Flammen. „Neuwerk“ versucht weiter zu kühlen.

27. Oktober 1998 (Sturm aus westlicher Richtung 8 - 9 Bft., Wellenhöhe 8 - 9 m)

- Auf dem Havaristen bricht der Brand trotz fortlaufender Kühlung durch „Neuwerk“ und Seenotrettungskreuzer „Wilhelm Kaisen“ erneut aus. In der Nacht trifft Schlepper „Alex Gordon“ beim Schleppverband ein.
- 01.30 Uhr: RK „Wilhelm Kaisen“ hat Kühlung des Havaristen wegen Wetterbedingungen abgebrochen. Zur Zeit starke Rauchentwicklung, kein offenes Feuer.
- 06.45 Uhr: Feuer ist wieder ausgebrochen. Kühlung dringend erforderlich. Schlepper „Alex Gordon“ wartet mit Umspannen auf Tageslicht.

- 07.13 Uhr: Einsatzzorder für „Oceanic“: Bitte zum Havaristen zwecks Brandbekämpfung.
- 07.15 Uhr: Feuerwehr Cuxhaven, Herr Gillert an Bord „Neuwerk“: Wind zu stark zum Kühlen mit Wasser, Feuerwehr bleibt auf „Neuwerk“. Evtl. müßten mit „Hermann Helms“ noch Material und Leute der FW Cuxhaven transportiert werden.
- 08.19 Uhr: Schlepper „A. Gordon“ bestätigt, daß bei dem WX nicht möglich ist anzufassen. Schutzposition Helgoland ist für „A. Gordon“ o.k.
- 09.28 Uhr: „Oceanic“ erreicht den Havaristen, der von „Mellum“ auf zwei Squareleinen geschleppt wurde. Der Schleppzug bewegt sich mit ca. 3 km Fahrt in südliche Richtung, um in Wetterschutz E'lich von Helgoland zu kommen.
- Das Wetter zu diesem Zeitpunkt: 999 Hp, 6°, Wind WSW 8 Bft., Schwell aus SW 3 m. Der Havarist war stark verqualmt, der mittlere Kran war im Feuer umgestürzt und hing Stb.-Seite außenbords. Weitere Schäden am Havaristen. Der Havarist luvte im Schlepp der „Mellum“, aufgrund des achteren Aufbaus und einer Stb.-Ruderlage ständig an. Klar war, daß die Squareleinen der „Mellum“ das Schleppen nicht mehr lange überstehen würden.
- Da der Zeitpunkt des Brechens nicht abzusehen war, schien ein Überhieven des Geschirrs während des Schleppens zu riskant: In Absprache mit „Mellum“ wurde beschlossen, bis zum Brechen der Leinen weiterzuschleppen, da das Überhieven von Geschirr bei einem treibenden Havaristen einfacher ist. Außer der „Mellum“ befanden sich FFS „Meerkatze“, BGS 21, Kreuzer „W. Kaisen“ und der Kontrakt-Schlepper „Alex Gordon“ vor Ort.
- 12.20 Uhr: Die Schleppleinen der „Mellum“ brechen. Die Wassertiefe beträgt 20 m. Der Havarist legt sich sofort quer zur Windsee und Dünung und treibt mit ca. 3 kn auf Amrum zu.
- 13.34 Uhr: „A. Gordon“ fischt die gebrochenen Leinen der „Mellum“ auf und knotet sie auf seinen Schleppdraht. Kurze Zeit nach dem Anschleppen bricht die Leine.
- Da „A. Gordon“ kein anderes Schleppgeschirr außer seinem Schleppdraht an Bord hat, beschließen „Oceanic“ und „Mellum“ selber festzumachen. Dafür ordern sie den SAR-Hubschrauber. Der Havarist treibt währenddessen auf das Südende einer westlich von Amrum liegenden Bank zu.
- 15.25 bis
15.38 Uhr: Der Heli versucht die Leute auf dem Backdeck des Havaristen abzusetzen. Inzwischen rollt der Havarist in den Grundseen, die sich im flacher werdenden Wasser bilden, heftig um ca. 40 – 50° nach jeder Seite.
- Aufgrund dieser Situation, im Zusammenspiel mit den immer wieder auftretenden Sturmböen ist das Absetzen des Personals unmöglich. Der 1. NO sowie die 4 Neuwerkleute werden wieder auf „Oceanic“ abgesetzt. Nach Rücksprache mit dem ZMK soll vor Einbruch der Dunkelheit noch ein Versuch unternommen und ein Mann auf dem Havaristen abgesetzt werden, um den Bb.-Anker fallenzulassen. Der Havarist ist inzwischen in den Bereich zwischen Bank und Insel Amrum getrieben.
- 17.00 Uhr: Pos. 54° 33,4' N, 08° 05,6' E. Der Wind hat nachgelassen und weht aus W mit 5 Bft., der Schwell kommt aus SW mit 3 m Höhe.
- 17.20 Uhr: Der Anker fällt, 7 Kettenlängen sind um 17.30 Uhr GZ ausgesteckt. Der Havarist bleibt in seiner Position liegen. Der Freiwillige ist um 17.45 Uhr GZ wieder auf „Oceanic“.
- 19.00 Uhr: Der Kontraktsschlepper „A. Gordon“ versucht mit seinem anchorhandling-Geschirr die Ankerkette zu fischen, um sein Schleppgeschirr darauf festzumachen. Weil das Fahrzeug stark im Schwell stampft, springt die Kette zweimal aus dem Fanggeschirr.
- 23.00 Uhr: „A. Gordon“ stellt seine Versuche ein.
- 24.00 Uhr: WX: Wind aus W, 8/9 Bft., Schwell WzS 3 - 4 m. Der Anker hält.

28. Oktober 1998 (Orkanböen aus westl. Richtungen, 8 - 12 Bft., Wellenhöhe 9 m)

BAW-Workshop: Boden- und Sohl-Stabilität – Betrachtungen an der Schnittstelle zwischen Geotechnik und Wasserbau

- 07.20 Uhr: Es soll eine Schleppverbindung zur "Pallas", die weiterhin vor Anker liegt, hergestellt werden, um sie in tieferes Wasser und unter Landschutz von Helgoland zu bringen.
- 13.25 Uhr: Schleppgeschirr auf dem Havaristen ist fertig.
- 14.03 Uhr: "Mellum" hat die Schleppverbindung hergestellt und fährt ihren Schleppdraht aus. Driftgeschwindigkeit des Havaristen ca. 1,0 kn. Die Crew auf dem Havaristen macht jetzt noch den Stb.-Anker klar und "Mellum" fährt ca. 700 m Draht aus.
- 14.28 Uhr: In Pos. 54° 34,28' N, 08° 09,84' E wird die Kette des Bb.-Ankers abgebrannt. "Mellum" erhöht die Zugkraft, der Havarist folgt gut.
- 14.58 Uhr: Die Schleppverbindung bricht, wie sich herausstellt, im Auge des auf dem Havaristen gefundenen Drahtes. Der Havarist fängt sofort an Richtung Küste zu vertreiben.
- 15.20 Uhr: Der Stb.-Anker wird geworfen.
- 15.30 Uhr: Ca. 8 - 9 Kettenlängen sind ausgesteckt. Bei WNW Wind von 9 -10 Bft. und 5 in hohem W' lichen Schwell treibt der Havarist mit 1,5 kn weiter.
- 17.07 Uhr: Der Heli hat die Crew abgehoben und versucht sie auf der "Oceanic" abzusetzen. "Meerkatze", "Oceanic" und der Kontraktsschlepper bleiben vor Ort und dampfen in der Nähe des Havaristen.
- 21.38 Uhr: Es wird festgestellt, daß der Havarist mit 0,25 kn stetig nach E vertreibt. Zu diesem Zeitpunkt ist er nur noch 0,25 sm von der 10 m-Tiefenlinie entfernt.

29. Oktober 1998 (schwerer Sturm, 10 Bft., Wellenhöhe 8 in)

- 05.15 Uhr: Der Havarist befindet sich in Pos. 54° 32,9' N, 08° 15,3' E und er treibt immer noch mit ca. 0,5 kn.
- Die "Neuwerk" trifft gegen 07.10 Uhr vor Ort ein.
- Bergung unterbrochen, da die Tiefgänge der hilfeleistenden Schiffe zu groß und Wetter anhaltend schlecht. Der Havarist liegt mittlerweile an der 5 m Tiefenlinie und sitzt vermutlich fest.
- 11.16 Uhr: Weisung an Fahrzeuge vor Ort, Ölaustritt aus Havaristen unverzüglich an SBM/SLM zu melden.

Anlage 2:

Auszug aus dem Amtlichen Gutachten des Deutschen Wetterdienstes

Amtliches Gutachten des Deutschen Wetterdienstes, Geschäftsfeld Seeschifffahrt, über die Wetter- und Seegangsbedingungen vom 25.10-07.11.98 in Bezug auf die Havarie des MS 'PALLAS' in der Deutschen Bucht vom 22.01.1999

Wetterlage:

In der Zeit vom 25.-30.10.98 wurden die Wetterverhältnisse in der Nordsee durch ein nordatlantisches Tiefdrucksystem bestimmt, dessen Schwerpunkt sich unter Abschwächung langsam ostwärts verlagerte. Auf seiner Südseite zogen in rascher Folge Tiefausläufer und Randtiefs von Westen her in Richtung Südschandinavien, so daß das Seegebiet vor Sylt und Amrum in dieser Zeit überwiegend unter starken bis stürmischen Westwinden lag. Eine Umstellung der Wettersituation setzte in der Nacht zum 01.11.98 ein, als ein Randtief

Wind- und Seegangsbedingungen:

Aus den vorliegenden meist stündlichen Meßwerten von Schiffs- und Küstenstationen wurden die Windverhältnisse vom 25.10.-07.11.98 im jeweiligen Seebereich von MS "PALLAS" ermittelt. Die Ergebnisse wurden in Tabellen zusammengestellt, aus denen Einzelheiten des täglichen Windverlaufs bei MS "PALLAS" an den einzelnen Tagen entnommen werden können. Die Tabellen enthalten zunächst die 10-Min-Mittel des Windes in einstündlichem Abstand im Bereich von MS "PALLAS". Um die Turbulenz des Windes zu erfassen, wurden zusätzlich Böen aufgeführt. Da auf Schiffen keine Böenaufzeichnung stattfindet, wurden die Böenangaben den Messungen der nächstgelegenen Inselstation, im überwiegenden Zeitraum List/Sylt, entnommen. Auch die Sichtangaben

In 6-stündlichem Abstand wurden die kennzeichnende Wellenhöhe des Seegangs aus Windsee und Dünung sowie die zugehörige mittlere Wellenperiode angeführt. Die kennzeichnende Wellenhöhe entspricht dem Mittel aus den höheren gut ausgeprägten Wellen eines Seegangs. Einzelne Wellen sind demnach höher als die kennzeichnende Wellenhöhe und können diese z.T. um bis zu 100% übersteigen.

Am 25. und 26.10. wurden die kennzeichnenden Wellenhöhen im Bereich der Pallas in tieferem Wasser aus vorliegenden Seegangsmessungen, Modellrechnungen und dem örtlichen Windverlauf abgeschätzt. Wegen der Drift von MS "PALLAS" in flachere Gewässer wurden ab dem 27.10. die Wellenangaben den Meßwerten einer Wellenboje des Amtes für ländliche Räume in Husum entnommen, die auf etwa 13 m Wassertiefe vor Westerland verankert ist.

Es ist davon auszugehen, daß in dem unmittelbaren Flachwasserbereich der Strandungsposition ab dem 29.10. die Wellenhöhen geringer waren. Zusätzlich wurde hier der Verlauf der Wellenhöhe stark vom Stand der Gezeiten mit ihren wechselnden Wassertiefen geprägt.

Zusammenfassend ergeben sich für die Tageslichtzeiten an den einzelnen Tagen folgende Wind- und Seegangsverhältnisse im Bereich von MS "PALLAS":

26.10.98	Wind:	W - WNW 8 Bft, langsam abnehmend 5-6 Bft.
	See:	4.5 m, langsam abnehmend 2.5 m.
27.10.98	Wind:	SSW 7-8 Bft, nachmittags WSW-drehend, kurzzeitig abnehmend 4-5 Bft.
	See:	1.5 m, zunehmend 3-3.5 m, nachmittags 3-2.5m.
28.10.98	Wind:	WNW - W 7-8 Bft
	See:	3 m, zunehmend 4-4.5 m
29.10.98	Wind:	W - WNW 7-8 Bft
	See:	3.5-4m
30.10.98	Wind:	WNW - NW 6 Bft.
	See:	3 m, abnehmend 2.5 m.
31.10.98	Wind:	WNW - W 6 Bft, abnehmend 5 Bft.
	See:	2.5 - 2 m.